

Medidas de parámetros de incidencia de campos electromagnéticos sobre sistemas biológicos en el rango de frecuencia de 50 MHz A 1 GHz

Daniel Rosas Tapia

Duván Javier Mejía Mateus

TES América Andina Ltda.

drosas@tesamerica.com

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Facultad Seccional Sogamoso

Escuela de Ingeniería Electrónica

dj_mejia@yahoo.com.mx

Fecha de recepción: 03-01-2005

Fecha de aceptación: 29-04-2005

ABSTRACT

Latin America is now the region with the highest growth rate in the telecommunications sector worldwide, and Colombia is one of the countries in this region.

An increasing concern has been raised regarding the potential biological effects of radiation associated with these applications.

In response to these concerns, the Colombian Ministry of Communications has adopted limits of human exposure to electromagnetic fields following UIT-T K.52 recommendation as a reference guideline.

This report undoubtedly makes valuable contributions to the methodolo-

gy for measuring emissions within a frequency range that encompasses a considerable number of telecommunications applications under (populational) human exposure conditions.

KEY WORDS

non-ionizing radiation, electric field intensity, power density, SAR, propagation, polarization, basic restrictions, reference levels, populational exposure, percentile exposure, dielectric properties, TESMonitor© frequencies, spectrum analyzer, antenna.

RESUMEN

Actualmente América Latina es la región que presenta el más alto índice de crecimiento del sector de tele-

comunicaciones en el mundo y Colombia se cuenta entre ellos. Sumado a ello se ha originado una creciente preocupación por los posibles efectos biológicos de las radiaciones de estas aplicaciones. Por ello el Ministerio de Comunicaciones de Colombia ha adoptado límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, tomando como referencia la recomendación UIT-T K.52. Indudablemente en este informe se hacen significativos aportes en cuanto a la metodología de medición de las emi-

siones en un rango de frecuencia que cubre gran parte de las aplicaciones de telecomunicaciones, en condiciones de exposición poblacional.

PALABRAS CLAVE

Radiación no ionizante, intensidad de campo eléctrico, densidad de potencia, SAR, propagación, polarización, restricciones básicas, niveles de referencia, exposición poblacional, exposición porcentual, propiedades dieléctricas, bandas, TESMonitor©, analizador de espectros, antena.

I. INTRODUCCIÓN

Todos los organismos vivientes desde el tiempo de su origen sobre la tierra hasta ahora han sido irradiados, y en el futuro, en cualquier parte, ellos continuarán siendo irradiados. En términos generales nuestro organismo no ha desarrollado mecanismos para comunicar al cerebro la incidencia de radiaciones electromagnéticas en la gama de las radiofrecuencias (RF) y microondas (MW).

Antes del siglo XX las únicas fuentes de radiación de RF eran nuestro sol y el ruido extrasolar (radiación de fondo). Durante la década de 1940, principalmente como resultado de la investigación y el desarrollo en la guerra y la industria, la generación de energía de RF tuvo un espacio para su crecimiento. Inicialmente la contribución de la radiación de cada una de estas aplicaciones y dispositivos era imperceptible comparada con la radiación solar entrante y muy pocas veces los seres humanos fueron expuestos a niveles de radiación que podrían ser preocupantes. Después comenzó un aumento en el número de aplicaciones cuyo fundamento es la energía de RF, entre las que se incluyen: transmisores de radio FM, radares, televisión, servicios públicos móviles, transmisores/receptores de comunicaciones, hornos residenciales de microondas y el teléfono celular portátil.

Desde finales de la década de 1970 varios productos comerciales y aplicaciones de telecomunicaciones proporcionan niveles de exposición de radiación de RF que son significativamente superiores a cualquiera de los anteriores niveles presentes, llegando a considerarse como una nue-

va fuente de contaminación. Además, es un hecho que la densidad electromagnética de nuestro medio ambiente se ha multiplicado por más de mil millones en los últimos treinta años, producto del desarrollo socio industrial.

Aunque las telecomunicaciones se introdujeron en Colombia hace más de ochenta años, fue en la década de 1940 que hubo un impulso dirigido hacia el desarrollo de esta área en nuestro país. Actualmente América Latina es la región que presenta el más alto índice de crecimiento del sector en el mundo y Colombia se cuenta entre ellos. Por ello, a comienzos del presente año, el Ministerio de Comunicaciones redactó un proyecto de decreto que establece límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos (CEM) producidos por estaciones radioeléctricas en la banda de frecuencias de 9 kHz a 300 GHz, fundamentados en la recomendación UIT-T K.52, de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.²⁶ Actualmente el Ministerio está dedicando especial interés al desarrollo de una metodología concreta para la evaluación de los límites de exposición.

Dentro del marco de la investigación “Fundamentos y medidas de parámetros de incidencia de los campos electromagnéticos sobre sistemas biológicos en el rango de frecuencia de 50 MHz a 1 GHz”,¹⁴ que se ha adelantado entre la empresa *TES América Andina Ltda y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia U.P.T.C. – Escuela de Ingeniería Electrónica*, se desarrolló una metodología de medición de emisiones que, entre sus propósitos, buscaba satisfacer la necesidad planteada en el

proyecto de decreto del Ministerio de Comunicaciones.¹⁵

El trabajo de campo se desarrolló en la ciudad de Bogotá durante los días 21, 22 y 23 de octubre de 2004, en el sector de Suba y en el barrio Chicó (comprendido entre las Calles 88 y 100, y entre la Carrera 7 y la Avenida 19), dentro del rango de frecuencias de 50 MHz a 1 GHz, que incluye aplicaciones de TV VHF, FM, Radio UHF, TV UHF, servicio troncalizado, GSM fijas, espectro ensanchado y comunicación celular. Los dos lugares seleccionados son muy representativos, por su alta concentración de antenas y estaciones base. Por ejemplo, en el barrio Chicó se encontró una densidad de 28 estaciones/km², que soportan antenas de diferentes operadores.

Es de notar el especial interés internacional por los posibles efectos biológicos que actualmente ha causado la radiación electromagnética de RF. Durante las últimas décadas varias organizaciones y países han desarrollado pautas, recomendaciones de seguridad y normas de exposición.

2. FUNDAMENTOS

Es conveniente aclarar algunos conceptos que son indispensables en la comprensión de las pautas, de la incidencia de las ondas sobre sistemas biológicos y en la determinación de la metodología de medición.

La “radiación” electromagnética (*REM*) puede ser definida como ondas de energía eléctrica y magnética moviéndose juntas a través del espacio. El empleo de la palabra radiación para referirse a la propagación de los campos electromagnéticos sólo pone de manifiesto que los campos electro-

magnéticos se propagan en forma de ondas a través del espacio o de un medio material.

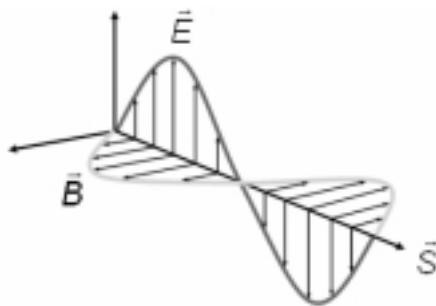


Figura 1. Radiación electromagnética (REM).

La radiación o lanzamiento de las ondas al espacio se logra de manera eficiente con ayuda de estructuras conductoras o dieléctricas llamadas “antenas”.^{5,12} Una antena es un dispositivo formado por un conjunto de conductores que, unido a un generador, permite la emisión de ondas de radiofrecuencia. Sin ir muy profundo, se sabe que una corriente que circula por un conductor creará un campo eléctrico y magnético en sus alrededores. Como las señales en la antena varían con el tiempo, las ondas electromagnéticas se propagan alejándose de las mismas y se dice que ha ocurrido el fenómeno de radiación (ver Figura 2).

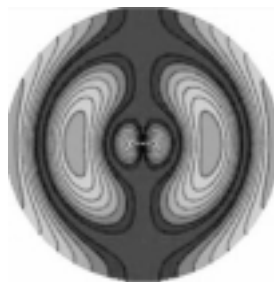


Figura 2. Generación y propagación de ondas electromagnéticas.²⁷

Las mediciones se realizaron en la zona de campo lejano de las antenas, donde es posible establecer un modelo de onda plana para el fenómeno de propagación, es decir, donde los vectores E, B y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares, la fase de los campos E y B es la misma y la densidad de potencia S está relacionada con los campos eléctricos y magnéticos por expresiones sencillas.

La transferencia de energía se describe con el vector de Poynting (**S**), que expresa la magnitud y dirección del flujo electromagnético. Es la razón del flujo de energía por unidad de área por unidad de tiempo. Así que los campos electromagnéticos interactúan con la materia principalmente transfiriendo parte de su energía. Según su frecuencia y energía, las ondas electromagnéticas de RF (3 kHz a 300 GHz) se clasifican como radiación no ionizante (RNI), las cuales no tienen la suficiente energía como para romper los enlaces atómicos^{6,13} (Ver Figura 3).

Los mecanismos físicos que permiten explicar cómo interaccionan los campos eléctricos y magnéticos con los sistemas biológicos son de naturaleza térmica o no térmica.^{17,13}

- Los efectos térmicos ocurren cuando en una muestra se deposita energía de RF suficiente para causar un aumento medible en la temperatura; por ejemplo, más de 0.1°C. Tienen lugar en períodos cortos y a niveles relativamente altos de contaminación electromagnética.
- Los efectos no térmicos ocurren cuando la energía depositada en la muestra es menor que la asociada con las normales fluctuaciones de temperatura del sistema biológico que es estudiado. Incluyen efectos biológicos inducidos en largos períodos de exposición y a más bajos niveles de exposición en comparación con efectos térmicos. Un mismo efecto biológico puede producirse con intensidades bajas si la temperatura ambiente es mayor.

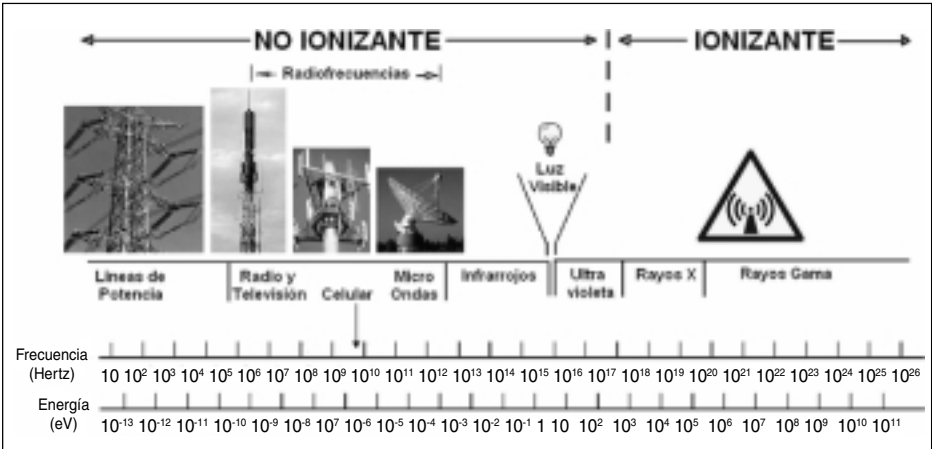


Figura 3. Espectro electromagnético y clasificación a efectos biológicos.¹⁸

La temperatura de la materia no es más que una medida del grado de agitación o movimiento de los átomos y moléculas que la forman. Mediante la radiación electromagnética es posible aumentar el movimiento de los átomos y moléculas y por tanto elevar la temperatura de la materia. La absorción de energía de los campos electromagnéticos en el cuerpo es mayor dentro del rango de resonancia, que varía entre 30 MHz y 300 MHz. La resonancia implica un significativo aumento en la absorción de energía por unidad de energía incidente, cuando la longitud de onda incidente es comparable a las dimensiones del cuerpo. Cuanto más pequeño es el cuerpo más alta es la frecuencia de resonancia. Esta resonancia ocurre cuando la longitud del cuerpo es de aproximadamente 0,4 veces la longitud de onda incidente. Para la cabeza humana, asumiendo una longitud de 20 cm, el pico de la resonancia se produce a los 600 MHz.¹ Y son precisamente los efectos no térmicos los que añaden mayor controversia al tema de salud y campos electromagnéticos. No hay discusión en que las ondas de campos de RF provocan un aumento local en la temperatura del tejido. Pero ¿qué consecuencias se presentan en una persona que está expuesta en forma continua a niveles de RF que no provocan efectos térmicos? Al respecto nadie ha dado resultados concluyentes.

La tasa de absorción específica (o SAR de sus siglas en inglés: *Specific Absorption Rate*) es la unidad dosimétrica usada para representar efectos biológicos y se usa también para definir el alcance de los límites de exposición. La tasa de absorción específica es la cantidad que describe la potencia de

absorción de los campos electromagnéticos en los tejidos, expresados en vatios por kilogramo (W/kg). Las investigaciones teórico-prácticas estiman que la exposición ambiental de todo el cuerpo en reposo, durante 30 minutos con un SAR de 1 a 4 W/kg, produce un aumento de temperatura de menos de 1°C.⁶

Para radiación de tipo no ionizante, la relación entre la exposición y la distribución de SAR depende de varios parámetros.²⁰

- Parámetros de transmisión (como la intensidad del campo eléctrico, la frecuencia, la polarización y distancia a las fuentes).
- Parámetros físicos del sistema biológico (como las propiedades dieléctricas del tejido y la densidad del tejido expuesto) y
- Factores ambientales (como la temperatura y la humedad).

El SAR es determinado de acuerdo con la siguiente ecuación:¹⁹

$$SAR = \frac{|E|^2 \sigma}{\rho}, \quad (1)$$

donde $|E|$ es la magnitud del campo eléctrico RMS medido o calculado (V/m), σ es la conductividad (S/m) y ρ es la densidad del tejido corporal (kg/m^3).

3. PAUTAS Y RECOMENDACIONES

La investigación científica sobre los efectos biológicos comenzó a desarrollarse a partir de 1950, aproximadamente. Es así como diferentes organizaciones y países han publicado pautas y recomendaciones que indiquen límites de seguridad de exposición de las personas a campos electromagnéticos, con base en estudios

epidemiológicos en seres humanos, *in vivo* e *in vitro*.¹⁶

Las más aceptadas internacionalmente son las dictadas por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP, *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*),¹¹ por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Inc (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*)² y por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*).¹⁹ Es así que países como Brasil, Argentina, Chile, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, México, Canadá, Reino Unido, España, Portugal, Irlanda, Suecia, Hungría, Francia, Dinamarca, Noruega, Finlandia, Alemania, Holanda, Italia, Bélgica, Japón, Corea, Taiwán y Singapur, entre otros, han adoptado las recomendaciones del ICNIRP.¹⁶

En 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció un programa ("Proyecto Internacional CEM") diseñado para analizar la literatura científica relacionada con los efectos biológicos de los campos electromagnéticos, identificar los vacíos en el conocimiento sobre tales efectos, recomendar la investigación necesaria y el trabajo hacia la solución de las preocupaciones relacionadas con la salud, a nivel internacional, originadas por el uso de la tecnología de RF. Se ha presupuestado que los resultados de este programa sean publicados en el año 2007.

3.1 Restricciones básicas y niveles de referencia

La mayoría de los documentos indican límites de seguridad en forma de

restricciones básicas y niveles de referencia.²⁶

- Las *restricciones básicas* corresponden a las magnitudes fundamentales que determinan la respuesta física o lógica del cuerpo humano a los campos electromagnéticos. Los límites básicos de exposición de las personas se expresan en forma de SAR, absorción específica (SA, *specific absorption*) y densidad de corriente (*J*).
- Como las magnitudes básicas son difíciles de medir directamente, se indican *niveles de referencia*, como son intensidad de campo eléctrico (*E*) o campo magnético (*H*) y densidad de potencia (*S*). Estos niveles son proporcionados con fines de evaluar en forma práctica las exposiciones para determinar si es probable que las restricciones básicas sean excedidas.

3.2 Exposición no controlada/ público en general y exposición controlada/ocupacional

La mayoría de los documentos utilizan una estructura de límites en dos escalas, en la que se especifican niveles inferiores para la exposición no controlada del público en general (poblacional) que para la exposición controlada/ocupacional.^{26,19,11,2,7}

- *Exposición de público en general:* Aquella donde las personas expuestas a ondas electromagnéticas no forman parte del personal que labora en una estación radioeléctrica determinada; no obstante, están expuestas a las emisiones de campo electromagnético de radiofrecuencia producidas por dichas estaciones.
- *Exposición ocupacional:* Aquella donde las personas que laboran en

una estación radioeléctrica están expuestas a ondas electromagnéticas como consecuencia de las actividades cotidianas de su trabajo, en forma continua, y que además han sido advertidas del potencial de exposición a emisiones radioeléctricas, pudiendo ejercer control sobre la exposición.

La sensibilidad al daño térmico de los diferentes tipos de tejido varía extensamente, pero la mayoría de las recomendaciones incorporan un margen de seguridad tomando como referencia el umbral para los efectos irreversibles en tejidos más sensibles (niveles potencialmente nocivos para la salud). El margen para exposición ocupacional es 10 y para exposición del público en general es 50.

3.3 Cantidades dosimétricas

Las cantidades dosimétricas en estas recomendaciones,¹¹ tomando en cuenta los diferentes rangos de frecuencia, son:

- Densidad de corriente (J) en el rango de frecuencia hasta 10 MHz.
- Corriente (I), en el rango de frecuencia hasta 110 MHz.
- Razón de absorción de energía (SAR) en el rango de frecuencia de 100 kHz-10GHz.
- Absorción de energía específica (SA), para campos pulsantes en el rango de frecuencia de 300 MHz-10GHz.
- Densidad de potencia (S), en el rango de frecuencia de 10-300GHz.

3.4 Nivel de exposición porcentual

La intensidad del campo y los límites de densidad de potencia están basados en la exposición promedio de

todo el cuerpo. Esto significa que algunos valores locales de exposiciones que excedan la intensidad del campo y los límites de densidad de potencia, necesariamente no implican el incumplimiento; si el nivel de exposición porcentual de los campos RF sobre las porciones expuestas del cuerpo de una persona no excede los límites,¹⁹ es decir, si la densidad de la potencia de un campo electromagnético incidente aumenta, entonces el aumento relativo del SAR del cuerpo entero será directamente proporcional al aumento del SAR de cualquier parte del cuerpo.

4. EQUIPOS Y METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

Las variables físicas que se miden durante las pruebas de campo son: intensidad de campo eléctrico (V/m o dB μ V/m), intensidad de campo magnético (A/m) y densidad de potencia (W/m²). Cada una de estas variables permite la evaluación de los límites de exposición de una manera clara y precisa.

4.1 Especificaciones

La empresa TES América Andina Ltda cuenta con un sistema integrado de monitoreo transportable (SIMT). Es un conjunto de elementos de software y hardware integrados para facilitar la labor de monitoreo del espectro y recepción de ondas radioeléctricas, que opera en el intervalo de frecuencias de 10 KHz a 26 GHz.²⁴ Puede funcionar como una unidad independiente o integrada a un móvil especialmente acondicionado para el suministro de alimentación. Con esta unidad es con la que se realizaron las *medidas selectivas*.

El SIMT usado en esta medición se compone de los siguientes elementos:²⁵

1. Analizador de espectros como instrumento de medición con interfaz GPIB (IEEE-488).
2. Un computador portátil como elemento de control y corazón del sistema, con el software *TESMonitor*® para la automatización, adquisición y análisis de datos, con una interfaz GPIB (IEEE-488).
3. Antena Bilogical SAS/521 25 MHz – 1300MHz.

4. GPS (Ver Figura 4).

En cuanto a las *mediciones en banda ancha*, el instrumento más importante es el EMR 300 (detector de radiación). Tiene varias sondas intercambiables, dependiendo de la variable a medir (campo eléctrico o magnético) y del rango frecuencia. Específicamente se usó la sonda de campo eléctrico TIPO 18 (100 kHz a 3 GHz). (Ver Figura 5).

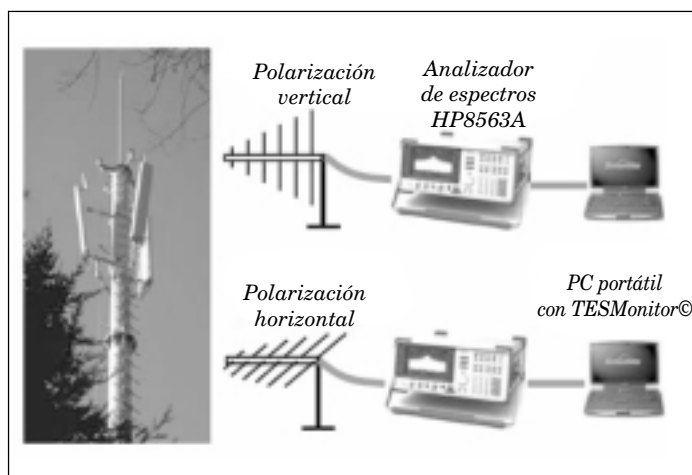


Figura 4. SIMT. Medición selectiva.^{8,14}

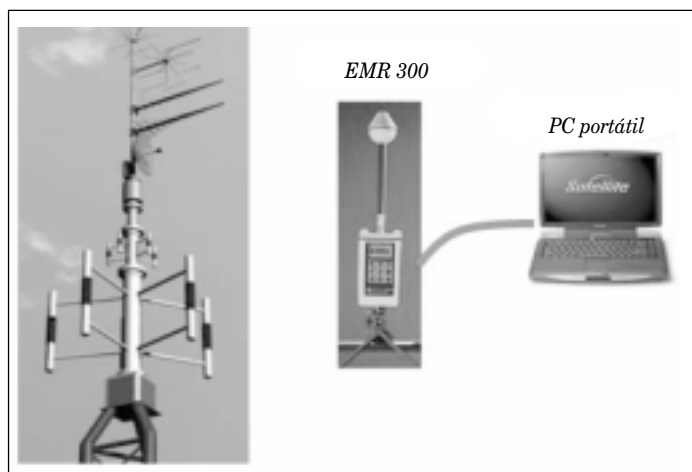


Figura 5. Medición en banda ancha.^{8,14}

Este instrumento registra *valor instantáneo, máximo, promedio y máximo promedio* de la variable que se está midiendo (V/m, A/m o W/m²). El *valor máximo* que muestra es el que ha registrado desde el momento en que se encendió el instrumento. El *valor promedio* que el instrumento muestra lo ha obtenido de las muestras tomadas en los últimos seis minutos (900 muestras, puesto que el EMR 300 tiene un período de muestreo de 400 mS). Además, tiene una interfaz serial para transmitir los datos almacenados en la memoria al computador.

4.2 Software utilizado

Las señales capturadas por la antena son llevadas a un PC portátil que tiene instalado un software especializado llamado TESMonitor®, que es un sistema portátil integrado de monitoreo diseñado para automatizar la gestión del espectro radioeléctrico. Está compuesto por dos aplicaciones: TESData® y TESpectrum®.

TESData® es el resultado de la evolución de más de diez años de desarrollo resolviendo las necesidades planteadas en diferentes escenarios donde el control y vigilancia del espectro radioeléctrico es muy reducida o no existe. Tiene incorporadas funciones y elementos de adquisición y apoyo que le dan características muy especiales con respecto a otro tipo de software comercialmente disponible en el mercado mundial.

TESpectrum® proporciona una gran capacidad de análisis con diversas opciones de reproducción de escenarios observados durante la medición, una gran variedad de representaciones de la información registrada y la

capacidad de proceso de un gran volumen de registros para facilitar el manejo y selección de información; en ese caso con este módulo, un PC puede transformarse en un Analizador de Espectros virtual.

4.3 Metodología de medición

Como se mencionó anteriormente, las mediciones se hicieron en condiciones de espacio libre, en la región de campo lejano de las antenas. La frontera (R) entre el campo lejano y cercano está dada por la siguiente aproximación.²¹

$$R = \frac{2d^2}{\lambda} \quad (2)$$

donde d : es la dimensión más grande de la antena (m).

λ : es la longitud de onda de la portadora transmitida (m).

Las mediciones se llevaron a cabo en dos entornos bien representativos: en el barrio Chicó y en las cercanías al cerro de Suba, ambos en la ciudad de Bogotá.

Barrio Chicó. Las pruebas de campo se realizaron en el sector comprendido entre las Calles 88 y 100 y entre la Carrera 7 y Avenida 19. Esta zona está caracterizada por la presencia de edificios de oficinas comerciales y diplomáticas.

Durante los días 21 y 22 de octubre de 2004, utilizando el *sistema de medición en banda ancha (EMR 300)*, se realizó un muestreo en toda la zona demarcada (ver Figura 6), buscando identificar los *HOT SPOTS* (valores de campo eléctrico que son claramente superiores a los valores registrados en el resto de la zona) en la región de público en general, a la vez que se rea-

lizaba un test de las estaciones y antenas del sector. El resultado del test se puede observar en la Figura 8.

Las mediciones se realizaron entre las 7.00 y las 13.00 horas, y aunque había una moderada nubosidad, las condiciones de clima eran aceptables. Durante los dos días, en 140 lugares durante 6 minutos se registró la intensidad de campo eléctrico (ver Fi-

gura 7). Las mediciones tuvieron como objetivo el rango de frecuencia de 50 MHz a 1 GHz, y como la sonda de campo eléctrico TIPO 18 está caracterizada en toda esta banda, no hubo necesidad de cambiarla. Al final de este documento se anexan las fotos de las infraestructuras de soporte/antenas más cercanas a los hot spots (ver Anexo).



Figura 6. Ruta de medición (Barrio Chicó).



Figura 7. Sitios de medición (Barrio Chicó).

Ubicación de antenas - Proyecto radiación



Figura 8. Ubicación de antenas (Barrio Chicó).

Ahora se procedería a la *medición selectiva* en el lugar donde se registraron los hot spots. En estas pruebas de campo se realizó medición selectiva únicamente en el lugar donde se registró el valor máximo de intensidad de campo eléctrico. Específicamente, se realizó en la Calle 95 con Carrera 11A, el 23 de octubre, entre las 15.00 y las 18.30 horas. Durante la medición hubo bastante nubosidad, llegando a presentarse una fuerte lluvia durante unos pocos minutos al comienzo de las pruebas. Las bandas que se monitorearon están especificadas en la Tabla 1.

Los sistemas de telecomunicaciones emplean diversas técnicas de polarización y dependiendo del tipo de aplicación dan origen a diferentes condiciones de propagación. Sin importar el tipo de polarización de la onda, es posible expresarla en términos de dos componentes polarizadas linealmente, uno en la dirección *x* y el otro en la dirección *y*. Y debido a que el pú-

blico en general se ve expuesto a ondas electromagnéticas de todo el espectro (sin discriminar su origen) y a las características de la antena, se realizaron mediciones en polaridad horizontal y vertical, en cuatro diferentes orientaciones, buscando una aproximación a un modelo isotrópico¹⁰ (ver Figura 9).

La antena se ubicó sobre una pértiga para conseguir una altura de 2 m sobre el nivel del suelo. En cada polaridad y en cada orientación se hacía una adquisición de datos durante seis minutos, con el objetivo de obtener el valor promedio de la intensidad del campo eléctrico.

Cerro Suba. Este lugar es altamente representativo puesto que una gran cantidad de operadores y aplicaciones de telecomunicaciones tienen instaladas allí sus antenas. Debido a esto se realizó únicamente *medición selectiva* el día 23 de octubre entre las 10.00 y las 14.00 horas. Durante las

Tabla 1. Frecuencias monitoreadas.

	Bandas de frecuencia	Servicios
1	54 MHz - 88 MHz	TV VHF (Ch 2-6)
2	88.4 MHz - 109 MHz	FM
3	174 MHz - 216 MHz	TV VHF (Ch 7-13)
4	254 MHz - 268 MHz	Troncalizado VHF
5	380 MHz - 512 MHz	Radio UHF
6	512 MHz - 518 MHz	TV UHF (Ch 21)
7	626 MHz - 680 MHz	TV UHF (Ch 41-48)
8	806 MHz - 824 MHz	Troncalizado UHF
9	824 MHz - 849 MHz	Celular - Base
10	851 MHz - 869 MHz	Troncalizado UHF
11	869 MHz - 894 MHz	Base - Celular
12	896 MHz - 898 MHz	Troncalizado UHF
13	898 MHz - 915 MHz	Líneas GSM fijas
14	903 MHz - 928 MHz	Espectro Ensanchado
15	935 MHz - 937 MHz	Troncalizado UHF
16	943 MHz - 960 MHz	Líneas GSM fijas

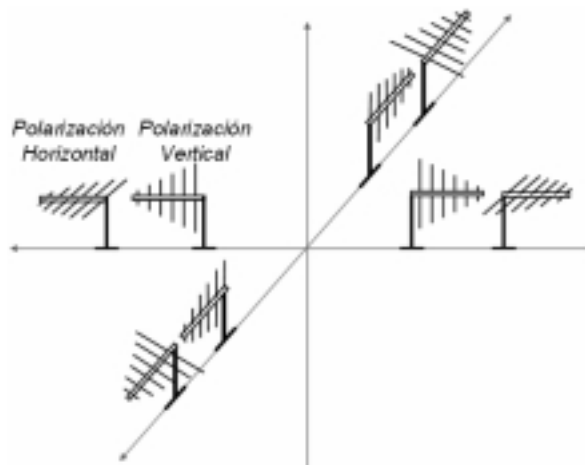


Figura 9. Orientación de la antena en cuatro direcciones (aproximación a un modelo isotrópico).

mediciones las condiciones atmosféricas fueron apropiadas, aunque sobre las 14.00 horas se comenzó a presentar una alta nubosidad. Las mediciones se realizaron en la parte más alta de la edificación ubicada exactamente en la Calle 128 No. 86A-05 (Barrio Tairinja) (Ver figura 10), desde la cual se tenía una línea de vista a las antenas de aproximadamente 450 metros (cumpliendo perfectamente con las condiciones de campo

lejano y de exposición de público en general). La zona de medición es netamente residencial.

Aunque la prioridad de medición en este lugar fue selectiva, también se realizaron medidas con el detector de radiación EMR 300. Las bandas monitoreadas y el procedimiento de medición siguen las pautas que se especificaron en la metodología de medición selectiva en el barrio Chicó.

Medición cerro de Suba

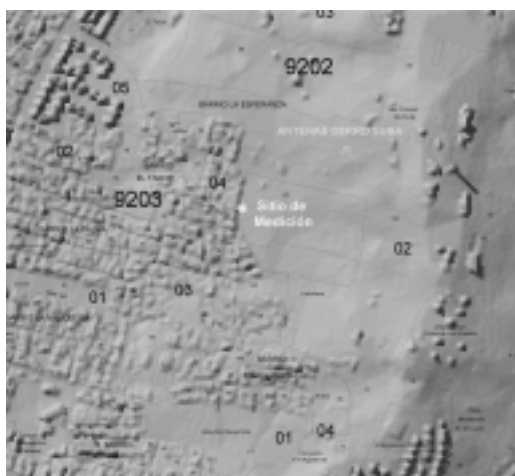


Figura 10. Ubicación del sitio de medición en cerro Suba.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS
DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

5.1 Mediciones en bana ancha

En el sector del barrio Chicó los hot spots fueron registrados en los siguientes lugares (por orden descendente): Ver Tabla 2.

La sonda de campo eléctrico que se empleó en el detector de radiación EMR 300 registra todas las ondas radioeléctricas dentro del rango de frecuencia de 100 kHz a 3 GHz. Pero como el sector está caracterizado por una alta densidad de antenas de comunicación celular, se podría indicar que los valores de intensidad de campo eléctrico se deben en su mayoría al aporte de las ondas en la banda de comunicación celular (869 MHz – 894

MHz). Los límites de exposición presentados en el proyecto decreto del Ministerio de Comunicaciones para esta banda (en condiciones de exposición poblacional) son: 40.53 V/m, para 869 MHz y 41.11 V/m, para 894 MHz. De tal manera que la máxima intensidad de campo eléctrico registrada (3.92 V/m) es solo el 9.6 % del valor límite de exposición comparada con la que se registró en Suba (10.78 V/m), que corresponde al 26.4 %.

Encontrar en Colombia y aun en la ciudad de Bogotá un sector en el que halla una densidad de infraestructuras de soporte/antenas comparable con la encontrada en el barrio Chicó, no es inmediato. El valor promedio obtenido en las mediciones fue de 1.149 V/m. (Ver Figura 11).

Tabla 2. Ubicación de hot spots (barrio Chicó).

Direcciones	Intensidad (V/m)
Carrera 12 - Calle 96	3,92
Carrera 7 - Calle 100	3,76
Carrera 14 - Calle 93A	3,22
Carrera 11A - Calle 99	2,96
World Trade Center	2,95
Carrera 10 - Calle 93B	2,85
Carrera 11A - Calle 94A	2,82
Carrera 11 - Calle 93A	2,76
Carrera 11A - Calle 97A	2,4
Carrera 9 - Calle 98	2,33
Carrera 13 - Calle 94A	2,27
Carrera 11 - Calle 95	2,16

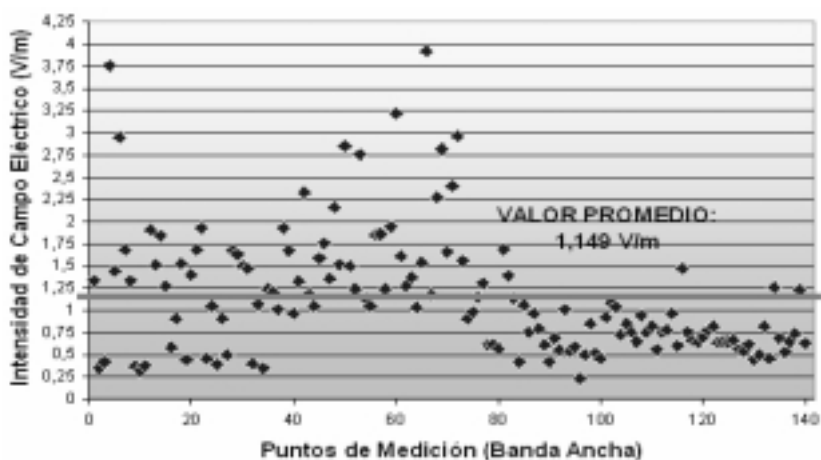


Figura 11. Intensidad de campo eléctrico para 100 kHz a 3 GHz (140 puntos en el barrio Chicó).

Después de verificar la continuidad de los datos obtenidos en las pruebas de campo y usando un modelo digital de la ciudad de Bogotá (propiedad de TES América Andina Ltda) cargado en un sistema de información geográfico (i.e. Arc View³), se desarrolló una interpolación de los datos, dando lugar a la Figura 12, en la que se observan claramente los lugares de mayor intensidad.

El 42% de los hot spots, incluyendo el sitio que registró la mayor intensidad, están ubicados entre las Calles 94 y 96 y entre las Carreras 11 y 14. Ello llevó a ubicar el lugar de medición selectiva en la Carrera 11A con Calle 95. Es de destacar que el hot spot de mayor intensidad está ubicado en la parte posterior de las antenas de Comcel (ubicadas sobre la Carrera 11, entre Calles 94 y 95).

5.2 Mediciones selectivas

El nivel de referencia de campo eléctrico ($\mu\text{V/m}$) se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$E(V/m) = 10^{\frac{E(\text{dB}\mu\text{V/m})}{20} - 6} \quad (3)$$

(Ver Figura 12)

Para los datos registrados en cada banda y en cada orientación (tanto en polarización horizontal como vertical) se obtuvo la intensidad promedio máxima de campo eléctrico. Luego, este valor se promedió con los resultados para las otras orientaciones por cada banda.

Las figuras 13, 14 y 15 muestran los resultados de las cuatro mediciones más representativas hechas en el barrio Chicó y en Suba, respectiva-

Interpolación de intensidades - Proyecto radiación



Figura 12. Mapa georreferenciado interpolando los niveles de campo eléctrico en el barrio Chicó.

mente. Tanto en las medidas realizadas en el Chicó, como en Suba, se observaron tres bandas que permanecieron con niveles predominantes [FM, TV UHF (Ch 21) y Celular] y esto podría orientar el énfasis en futuras mediciones.

En el barrio Chicó la banda de celular registró la mayor intensidad de campo eléctrico, 803.5 mV/m, mientras que en Suba la banda de FM registró una intensidad de 216.3 mV/m. Aun, desde el momento en que se estaban realizando las pruebas de la metodología de medición en el laboratorio de la empresa, la banda de FM registró intensidades que evidentemente sobrepasaron los niveles presentes en otras bandas. Y esto podría dar lugar a una evidente preocupa-

ción, puesto que los lugares en los que se hicieron las medidas selectivas están lejos de las fuentes de esas emisiones (especialmente en el barrio Chicó).

Los niveles de intensidad en Suba presentaron en general un aumento promedio del 22.5 % con respecto a los niveles presentes en el barrio Chicó. La banda de celular fue la única que no aumentó, debido principalmente a la alta concentración de antenas que caracterizan este sector. Un comentario de los habitantes de Suba resulta bien particular, pues ellos manifiestan que no tienen necesidad de instalar antenas (ni de TV ni de radio), para garantizar una excelente recepción.

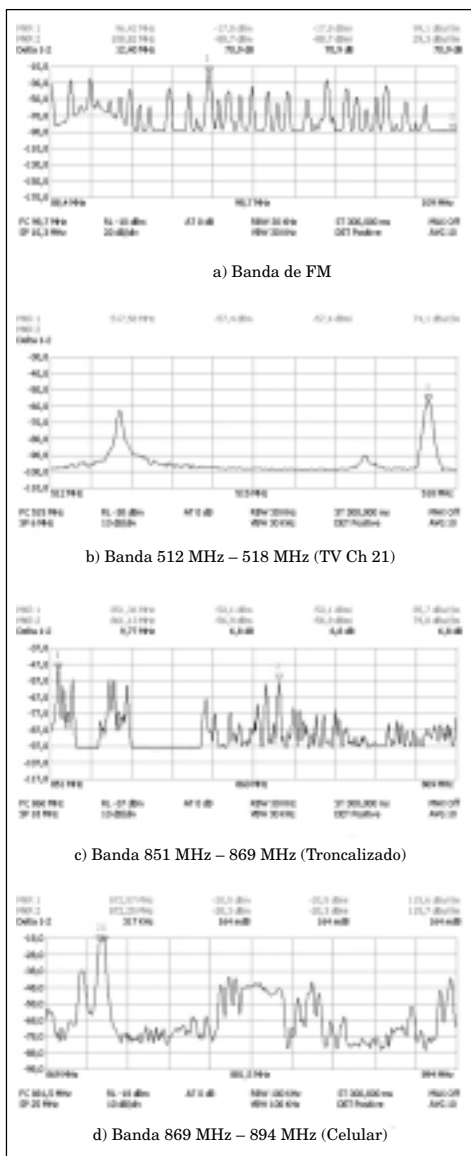


Figura 13. Mediciones del espectro en el barrio Chicó. Gráficas obtenidas de TESpectrum©. Software propiedad de TES América Andina Ltda.

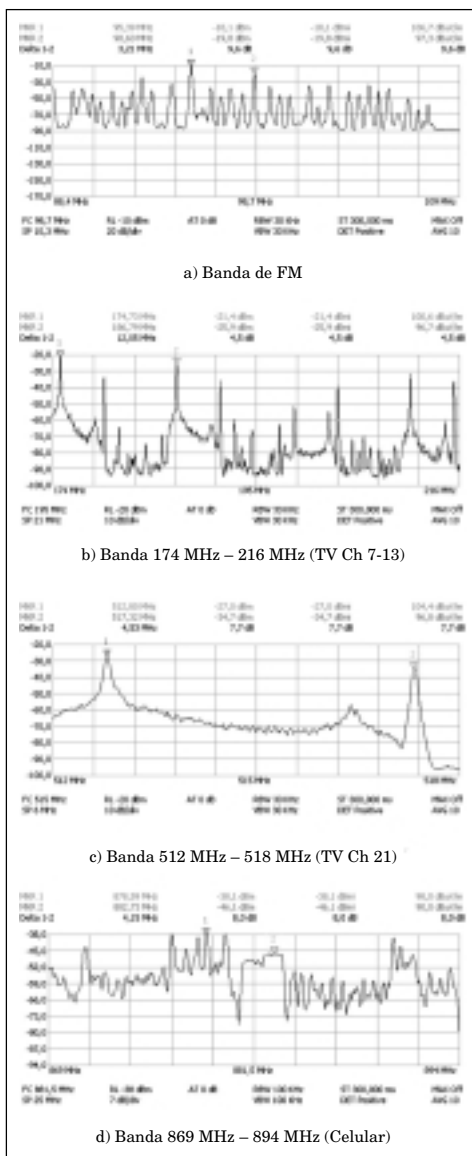
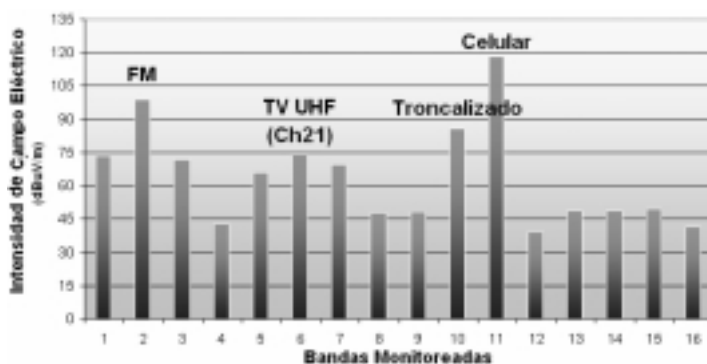
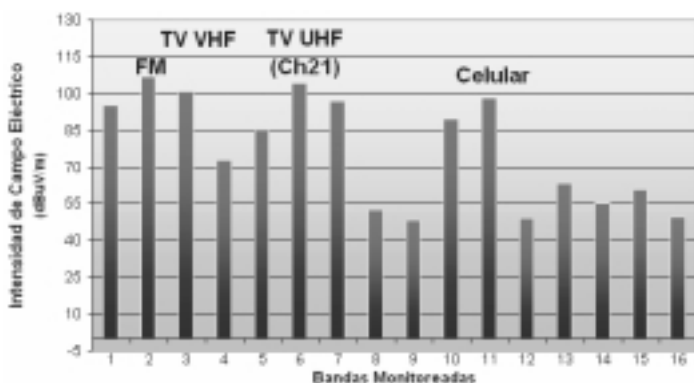


Figura 14. Mediciones del espectro en cerro Suba. Gráficas obtenidas de TESpectrum©. Software propiedad de TES América Andina Ltda.



a) Bandas más representativas en el barrio Chicó.



b) Bandas más representativas en el cerro Suba.

Figura 15. Comparación de medidas selectivas por banda de frecuencia específica.

Como puede observarse en la Tabla 3, los niveles obtenidos en las pruebas de campo cumplen de manera individual con los límites señalados. Luego se verificó que el nivel de exposición porcentual para campo eléctrico fuera menor que la unidad, según la banda de frecuencia. Para frecuencias entre 100 kHz y 300 GHz se realizó de la siguiente manera:

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{10\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{C} \right)^2 + \sum_{i>10\text{GHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (4)$$

donde: E_i = Intensidad de campo eléctrico en la frecuencia i .

$E_{L,i}$ = Nivel de referencia del campo eléctrico a la frecuencia i . (28 V/m entre 10 y 400 MHz, y $1.375 f^{0.5}$ V/m entre 400 y 2000 MHz).

$C = 87 f^{0.5}$ V/m, para el caso de exposición del público en general.

Tabla 3. Valores intensidad de campo eléctrico Vs. Límites de exposición. Medidas selectivas.

Bandas de frecuencia (MHz)	Valor Máximo Promedio Chicó (V/m)	Valor Máximo Promedio Suba (V/m)	Límites Exp. Poblacional (V/m)
54 - 88	0,0047863	0,0568853	28
88.4 - 109	0,0901571	0,2162719	28
174 - 216	0,0038459	0,1071519	28
254 - 268	0,0001413	0,0043652	28
380 - 512	0,0019724	0,0186209	28 - 31,112
512 - 518	0,0050699	0,1659587	31,11 - 31,29
626 - 680	0,0030200	0,0691831	34,40 - 35,86
806 - 824	0,0002512	0,0004266	39,04 - 39,47
824 - 849	0,0002541	0,0002570	39,47 - 40,06
851 - 869	0,0192752	0,0298538	40,11 - 40,53
869 - 894	0,8035261	0,0794328	40,53 - 41,11
896 - 898	0,0000944	0,0002818	41,16 - 41,21
898 - 915	0,0002786	0,0014962	41,21 - 41,59
903 - 928	0,0002786	0,0005888	41,32 - 41,89
935 - 937	0,0003090	0,0010965	42,04 - 42,09
943 - 960	0,0001175	0,0003090	42,22 - 42,60
Valores representativos.			

De acuerdo con lo anterior, tomando los valores promedio más altos dentro de cada banda, la exposición porcentual (entre 50 MHz a 1 GHz) en el barrio Chicó es igual a 0,000402182; mientras que en Suba es 0,000115593, resultados que son mucho menores que 1. Con estos resultados no es necesario corroborar el cumplimiento de las restricciones básicas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es un hecho que la densidad electromagnética de nuestro medio ambiente se ha multiplicado por más de mil millones en los últimos treinta años, producto del desarrollo socio-industrial. Esto ha dado lugar a la consolidación de diferentes organizaciones que en aras de la protección de los seres humanos han publicado pautas para la exposición de personas a cam-

pos electromagnéticos. La pauta IC-NIRP actualmente es la que tiene el mayor grado de aceptación internacional y ha sido adoptada por la OMS, la UIT, la Unión Europea y una gran cantidad de países suramericanos y asiáticos. Otras normas, que aunque tienen menor reconocimiento pero que al igual son vigentes, son publicadas por la IEEE y la FCC. En estas tres pautas no existen grandes diferencias, todas indican límites de seguridad en forma de restricciones básicas y niveles de referencia; considerando condiciones de exposición ocupacional (o controlada) y de exposición poblacional (o no controlada). La pauta elegida para realizar la evaluación de los niveles registrados en las pruebas de campo es la publicada por la UIT, que fue acogida recientemente como los límites de exposición en Colombia. Así que los datos, resultados y conclusiones tienen vigencia.

Los sitios de medición seleccionados son muy representativos, ya que suman características de alta concentración de fuentes de emisión de RF y múltiples servicios de telecomunicación, que permiten tener una referencia significativa con respecto a otros sectores. Debido a que las medidas realizadas en banda ancha en el barrio Chicó, sector caracterizado por una alta densidad de antenas de comunicación celular, se podría indicar que los valores registrados por el detector de radiación, principalmente, son el resultado de ondas en la banda de comunicación celular (869 MHz – 894 MHz). Teniendo en cuenta esto, el máximo valor de intensidad de campo eléctrico representa el 9.6% del valor límite de exposición poblacional, comparada con la que se registró en Suba (10.78 V/m), que correspondería al 26.4%.

De acuerdo con los datos de la Tabla 3 y con los valores de exposición porcentual, y aunque se cubre una pequeña parte del espectro de radiaciones no ionizantes, se puede confirmar que los hot spots, en los que se realizaron las mediciones selectivas [a) Carrera 11A con Calle 95; b) Carrera 86A con Calle 128; en un rango de frecuencia de 50 MHz y 1 GHz], cumplen con los límites de exposición para la población. Aunque ninguno de estos resultados supera los límites, sí se puede observar que los servicios que más energía aportan al medio son: a) servicio de radiodifusión sonora FM (88.4 MHz – 109 MHz), b) servicio de comunicación celular (869 MHz – 894 MHz), c) radiodifusión por TV UHF (512 MHz – 518 MHz) y d) servicio troncalizado UHF (851 MHz – 869 MHz).

Cerca de los sitios de medición existen construcciones y edificios cuya altura es comparable con la de las fuentes radiantes. Para futuras mediciones en dichos lugares se recomienda tener todos los permisos de acceso (algunos como resultado de alianzas y convenios para llegar a puntos más cercanos a las fuentes de emisiones electromagnéticas).

Existen varios parámetros de incidencia para llegar a establecer la energía por unidad de tiempo que es absorbida por los sistemas biológicos. Los parámetros más importantes son: la intensidad del campo eléctrico, la frecuencia, la polarización y distancia a las fuentes, las propiedades dieléctricas del tejido y la densidad del tejido expuesto. Es relativamente sencillo obtener los parámetros asociados al proceso de transmisión (que es lo que se ha hecho en el estudio), pero los parámetros físicos del sistema biológico exigen un trabajo de laboratorio de alto nivel. El Laboratorio Armstrong, perteneciente a la División de Radiación de RF del Comando de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, en Texas, ha publicado una recopilación de las propiedades dieléctricas de los tejidos humanos a frecuencias de RF y microondas.^{4,9,22,23} Otras organizaciones han publicado informes sobre los parámetros dieléctricos, pero todos toman como fundamento la publicación del Laboratorio Armstrong. Con estos antecedentes es posible llegar a determinar el SAR de una manera indirecta, pero que incluye los parámetros de los tejidos expuestos.

El software TESMonitor© (compuesto por dos aplicaciones: TESData© y TESpectrum© es una gran herra-

mienta para la medición, registro, análisis y reporte del espectro radioeléctrico, permitiendo una gran variedad de presentaciones de la información registrada y capacidad de proceso de un gran volumen de registros de una manera efectiva y precisa.

Indudablemente este estudio presenta significativos aportes en cuanto a la descripción de una metodología de medición de las emisiones de campos electromagnéticos, respaldado por la experiencia de la empresa TES América Andina Ltda. en estrategias y campañas de medición y los aportes de las investigaciones realizadas en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Sogamoso – Escuela de Ingeniería Electrónica. Debido a que

actualmente el Ministerio de Comunicaciones ha orientado sus objetivos hacia el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos (consolidado en el proyecto de decreto), el contenido de este estudio será de su especial interés. Además, se está abriendo una puerta hacia futuras etapas de investigación, que involucre un trabajo interdisciplinario y permita avances en la descripción del comportamiento de los tejidos biológicos frente a la exposición a campos electromagnéticos, en especial las radiaciones no ionizantes. Las aplicaciones de telecomunicaciones se hacen cada vez más indispensables en nuestra vida diaria y su crecimiento no tendrá fronteras.

ANEXO

Fotos de las infraestructuras de soporte/antenas encontradas en sitios con niveles de intensidad de campo eléctrico considerable, durante el test realizado en el barrio Chicó.



a) Carrera 7 Calle 100 b) Carrera 14 Calle 93A



c) Carrera 8A Calle 100



d) Carrera 9B Calle 100



e) Carrera 11A Calle 94A



f) Carrera 11 Calle 93A



g) Carrera 14 Calle 94A



h) Carrera 8A Calle 97A



i) Carrera 13 Calle 95



j) Carrera 15 Calle 90
(Oriente)



k) Carrera 17 Calle 93



l) Carrera 15 Calle 90
(Occidente)



m) Avenida 19 Calle 93



n) Cerro Suba

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Amena. *Informe telefonía móvil y campos electromagnéticos*. Madrid, España. Disponible en: <http://www.amena.com/presentacion/amenamedioambiente/descarga1.pdf>
2. ANSI/IEEE C95.1, *Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*.
3. Arcview GIS 3.2: advanced spatial analyst using raster and vector data. U.S: Environmental Systems Research Institute, 1996.
4. Camelia. Gabriel, *Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies*, Armstrong Laboratory, Brooks Air Force Base, TX, Brooks Air Force Technical Rep. AL/OE-TR-1996-0037 (Disponible en: <http://www.brooks.af.mil/AFRL/HED/hedr/reports/dielectric/home.html>).
5. Cardama Aznar, Angel; Jofre Roca, Lluís; Rius Casals, Juan Manuel; Romeu Robert, Jordi; Blanch Boris, Sebastián. *Antenas*. Edición publicada por . Editores UPC, S.L, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Editorial: Alfa y Omega. ISBN: 84-8301-250-2.
6. Centro Argentino de Ingenieros. Seminario “Estructura de Telecomunicaciones en Municipios – Normas y Principios de Seguridad”. 6 de septiembre de 2000. Bioseguridad con radiaciones no ionizantes. Comisión Nacional de Comunicaciones.
7. Consejo de la Unión Europea. *Recomendación del consejo relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)*. 12 de julio de 1999.
8. Cruz Ornetta, Víctor. *Diagnóstico Nacional de las Radiaciones No Ionizantes producidas por los servicios de Telecomunicaciones en el Perú*. Inictel - Perú.
9. FCC. *Interactive program for calculation of tissue dielectric properties*. isponible en: <http://www.fcc.gov.fcc-bin.dielec.sh>.
10. García A.; A. Paolo. *Análisis de irradiación electromagnética en las inmediaciones de una radio base sectorizada bajo condiciones andinas*. Universidad Industrial de Santander, E³T, Bucaramanga - Colombia.
11. ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz)*.
12. Kraus, John Daniel; Fleisch Daniel. *Electromagnetismo con Aplicaciones*. Quinta Edición 1999 (México). Editorial: Mc Graw Hill. ISBN: 970-10-2466-4.
13. L. de Guevara, Jaime Lluch; Macías Álvarez, Óscar. *Propiedades de la radiación electromagnética, y su influencia sobre sistemas biológicos* [Documento en línea]. Madrid, España. Disponible en: <http://www.asenmac.com/radiacion/radio0.htm>. Asenmac.
14. Mejía Mateus. Duván J. *Fundamentos y Medidas de Parámetros de Incidencia de Campos Electromagnéticos sobre Sistemas Bioló-*

- gicos en el Rango de Frecuencia de 50 MHz a 1 GHz. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Escuela de Ingeniería Electrónica. Grupo de Radiación. Sogamoso – Colombia.
15. Ministerio de Comunicaciones de Colombia. *Proyecto de decreto por el cual se adoptan límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se define metodología para la medición y se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas*. Colombia, 2004.
 16. Ministerio de Comunicaciones de Colombia. Foro: Campos Electromagnéticos y Salud Humana. *MMF Mobile Manufacturers Forum*. Aderbal Bonturi Pereira.
 17. Ministerio de Sanidad y Consumo. *Informe técnico elaborado por el Comité de Expertos: "Campos Electromagnéticos y Salud Pública"*. Madrid, España. 2001. Disponible en: http://www.msc.es/medioambiente/agenfisicos/campos_em/pdf/camposelectromagneticos.pdf
 18. OET Bulletin 65. U.S. Federal Communications Commission. *Evaluating Compliance with FCC Specified Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Radiation*. Office of Engineering and Technology, Edition 97-01, August 1997, Washington, D.C. 20554. Supplement B (additional information for amateur radio operators) Página 9.
 19. OET Bulletin 65, Supplement C (Additional information for evaluating mobile and portable RF devices). *Reglas FCC para la evaluación de dispositivos RF móviles y portátiles, pautas / recomendaciones para la evaluación de dispositivos RF móviles y portátiles*, Páginas 5-15, Páginas 26-27; Apéndice C: Parámetros dieléctricos de los tejidos, Páginas 34-36; Apéndice D: Procedimientos de medida del SAR, Páginas 37-51. Edition 97-01, August 1997, Washington, D.C.20554.
 20. Pickard, William F.; Moros, Eduardo G. *Energy Deposition Processes in Biological Tissue: Nonthermal Biohazards Seem Unlikely in the Ultra-High Frequency Range*. Bioelectromagnetics 22: 97-105 (2001).
 21. Sadiku, Matthew N.O. *Elementos de Electromagnetismo*. Segunda Edición. Primera reimpresión en 1999 (México). Compañía Editorial Continental, S.A (CECSA). Capítulo 13. ISBN: 9682613205
 22. S. Gabriel, R.W. Lau, and C. Gabriel, *The dielectric properties of biological tissues: 2: Measurement in the frequency range 10 Hz to 20 GHz*, *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, No. 11, pp. 2251- 2269, 1996.
 23. S. Gabriel, R.W. Lau and C. Gabriel, *"The dielectric properties of biological tissues: 3. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," Phys. Med. Biolo.*, vol. 41, No. 11, pp. 2271-2293, 1996.
 24. TES América Andina LTDA. *Sistema Portátil de Monitoreo del Espectro Radioeléctrico*. Manual de Conexión.
 25. TES América Andina LTDA. *Descripción de los estudios de interferencias*. Características de un estudio.

26. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Norma UIT K-52: *Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos*. Febrero de 2000.
27. Universidad Politécnica de Valencia, “*Antenas – Fundamentos de Radiación*” Disponible en: http://www.upv.es/antenas/Tema_2/campos_radiados_por_un_dipolo.htm

CURRÍCULO

Daniel Rosas: Ingeniero en comunicaciones y electrónica con énfasis en computación del Instituto Politécnico Nacional (Méxi-

co). Especialista en ingeniería de transmisión de datos (Japón). Presidente, fundador y CEO desde 1999 de la empresa TES América Andina, empresa certificada ISO 9001: 2000 en los servicios de consultoría en telecomunicaciones inalámbricas y desarrollo de software para la gestión del espectro radioeléctrico.

Duván Javier Mejía: Ingeniero electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Sogamoso, UPTCS. Docente-Investigador de la UPTCS. ☼